

Farklı oranlardaki $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{—Li}_2\text{O—TeO}_2$ karışımlarının gama radyasyonu yalıtım özelliklerinin Geant4 simülasyon kodu ve WinXCOM veri yazılımı kullanılarak karakterizasyonu

Ali AŞKIN^{1,*}, Murat DAL²

¹Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

²Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Geliş Tarihi (Received Date): 02.05.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.09.2019

Öz

Bu çalışmada, $x\text{Eu}_2\text{O}_3\text{—}(25-x)\text{Li}_2\text{O—}75\text{TeO}_2$ (lityum-öropiyum-tellür) ($x = \%1, \%2, \%3, \%4, \%5$ mol) camlarının gama radyasyonu kütle zayıflatma katsayıları (μ_m), gama radyasyonu transmisyonu (T), yarı değer kalınlığı (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) yalıtım parametreleri yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörünün Geant4 modeli ve WinXCOM veri tabanı kullanılarak 356 keV, 662 keV, 1173 keV, 1330 keV, 2510 keV ve 4000 keV foton enerjilerinde araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar cam örneklerinin kimyasal bileşenleri ve foton etkileşim mekanizmaları açısından değerlendirildiğinde, Öropiyum'un yüksek kütle numarası ve kimyasal formüldeki oranına bağlı olarak, %5 mol Eu_2O_3 içeren cam numunesinin gama radyasyonu yalıtım özelliklerinin %1 mol Eu_2O_3 içeren camdan yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Radyasyon yalıtımı, zayıflatma katsayısı, cam, Monte Carlo simülasyonu, Geant4.

* Ali AŞKIN, aliaskin@munzur.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-8571-3680>

Murat DAL, muratdal@munzur.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-5330-1868>

Characterization of gamma radiation shielding properties of different ratios of Eu_2O_3 — Li_2O — TeO_2 mixtures using Geant4 simulation code and WinXCOM software

Abstract

In this study, mass attenuation coefficient (μ_m), gamma transmission fraction (T), half value layer (HVL) and mean free path (MFP) of $x\text{Eu}_2\text{O}_3$ — $(25-x)\text{Li}_2\text{O}$ — 75TeO_2 (Lithium-Europium-tellurite) ($x = 1\%$, 2% , 3% , 4% , 5% moles) glasses have been investigated at the gamma ray energies of 356 keV, 662 keV, 1173 keV, 1330 keV and 2510 keV by using the Geant4 model of a high purity germanium (HPGe) detector and WinXCOM database. When the results have been interpreted, depending on the high atomic number and the fraction of Europium in the chemical formula, it was seen that the glass sample with 5% moles of Eu_2O_3 has higher radiation shielding ability compared to the glass sample with 1% mol of Eu_2O_3

Keywords: Radiation shielding, attenuation coefficient, glass, Monte Carlo simulation, Geant4.

1. Giriş

Gelişen teknolojiye bağlı olarak malzeme biliminde meydana gelen ilerlemeler yeni ve farklı yapıdaki malzemelerin sentezine imkan vermekte, buna bağlı olarak malzemelerin kullanım alanlarına bağlı olarak fiziksel, kimyasal mekanik, optik veya termal özelliklerinin karakterizasyonu önemli olmaktadır. Günümüzde radyoaktif izotopların nükleer reaktörler, araştırma merkezleri, hastaneler, tarım, sanayi ve arkeoloji gibi alanlarda yaygın olarak kullanılması nedeniyle, bu çalışma alanlarında kullanılacak malzemelerin radyasyon yalıtım özelliklerinin belirlenmesi, burada çalışan insanların radyasyonun zararlı etkilerine karşı korunabilmesi açısından önemlidir. Gama radyasyonunun yüksek delicilik özelliği ve uzak mesafelere ulaşabilmesi nedeniyle, yeni geliştirilen malzemelerin gama radyasyonu yalıtım kapasitelerinin belirlenmesi bu malzemelerin ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılabilirliğini belirleyecektir. Gama yalıtım özelliklerinin deneysel olarak karakterizasyonunda yaygın olarak NaI(Tl) sintilasyon veya yüksek saflıkta germanyum (HPGe) iyonlaşma dedektörleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, deneysel sistemlerin veya ölçümü yapılacak numunelerin bulunmadığı durumlarda, deneysel ölçüm sistemlerinin bilgisayar ortamında modellenmesi ve araştırmaların Monte Carlo simülasyonları ile gerçekleştirilmesi büyük oranda esneklik ve hız kazandırabilmektedir. Son yıllarda beton, kum, kil, tuğla, seramik, polymer ve alaşımlar gibi çeşitli doğal veya sentetik olarak üretilmiş malzemelerin radyasyon yalıtım özellikleri farklı araştırmacılar tarafından deneysel yöntemler veya Monte Carlo simülasyonları kullanılarak belirlenmiştir [1-7].

Cam malzemelerin sahip olduğu optik geçirgenlik, kolay hazırlama ve üretim avantajlarından dolayı, camların radyasyon yalıtım özelliklerinin tespiti konusu

araştırmacıların günümüzde yoğunlaştığı alanlardan biri durumundadır ve camların önemli bir gama radyasyon yalıtım potansiyeline sahip olduğu farklı çalışmaların sonucunda gösterilmiştir [8-10]. Camların sahip olduğu radyasyon yalıtım özelliklerinin açığa çıkmasıyla birlikte farklı çalışma grupları farklı kimyasal formüllere sahip camların sentezini yaparak yalıtım özelliklerini değerlendirmiştir. Eriyik soğutma tekniği kullanılarak hazırlanan ve farklı mol oranlarında PbO içeren altı farklı PbO-Li₂O-B₂O₃ camının gama yalıtım özellikleri deneysel olarak dört farklı gama enerjisinde ölçülmüştür. Kimyasal formülde yer alan PbO miktarının arttırılmasının gama yalıtım kapasitesini yükselttiği çalışma sonucunda belirtilmiştir [11]. La₂O₃'ün lantan-kalsiyum-silikarbonat camlarının radyasyon yalıtımı üzerine olan etkisi 224 ile 662 keV enerji aralığındaki sekiz farklı foton enerjisi için deneysel olarak ölçülmüş ve La₂O₃ oranının arttırılması ile bu camın radyasyon zayıflatma özelliğinin arttığı yayınlanmıştır [12]. Farklı mol oranlarında Bi₂O₃ ve BaO içeriğine sahip beş farklı Bi₂O₃-BaO-B₂O₃-Na₂O camı üretilerek bu cam sisteminin yapısal ve gama ışını yalıtım özellikleri Dogra vd. [13] tarafından deneysel olarak belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, cam sisteminin barit katkılı betona oranla daha yüksek kütle zayıflatma katsayısına ve daha düşük yarı değer kalınlığına sahip olduğunu göstermiştir [13]. 80TeO₂—5TiO₂—(15-x)WO₃—xA_nO_m cam sisteminin radyasyon zayıflatma özellikleri MCNP5 simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonları ve WinXCOM veri tabanı kullanılarak bilgisayar ortamında hesaplanmıştır. Kimyasal formülde bulunan xA_nO_m molekülü için 5Er₂O₃ kullanılmasıyla nötron ve gama radyasyonu yalıtım özelliklerinin arttığı belirtilmiştir [14].

Tellür içeren camlar, düşük erime sıcaklıkları (600-800 °C) [15], görülebilir ve kızıl ötesi ışık için sahip olduğu yüksek optik geçirgenlik oranı (6 µm' ye kadar) [16], yüksek kırılma indisi (1.8-2.3), yüksek dielektrik sabiti (13-35) [17] özelliklerinden dolayı optik iletişim, lineer olmayan optik cihazlar ve güneş enerjisi panellerinin verimliliğini arttırmak için [18] yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Kumar ve Khanna [19] tarafından yeni üretilerek, yapısal, termal ve fotonik özellikleri araştırılmış olan xEu₂O₃—(25-x)Li₂O—75TeO₂ (x = %1, %2, %3, %4, %5 mol) cam sisteminin gama radyasyonu yalıtım özellikleri yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü'nün Geant4 modeli ve WinXCOM veri tabanı kullanılarak araştırılmıştır.

2. Deneysel metot

2.1. Teorik metot

Kütle zayıflatma katsayısı, μ_m (cm² g⁻¹), gama fotonlarının madde içerisine nüfuz ve difüzyon özelliklerini tanımlayan bir parametre olup Eş. 1'de verilen Beer-Lambert yasası kullanılarak elde edilecek lineer zayıflatma katsayısı, μ (cm⁻¹) kullanılarak hesaplanabilir [9].

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

Bu eşitlikte, I_0 ve I sırası ile malzeme yüzüne gelen ve malzeme içinden geçerek dedektöre ulaşabilen yoğunluklarını, x (cm) zayıflatıcı yalıtım malzemenin kalınlığını göstermektedir. Cam malzemenin yüzüne gelen foton yoğunluğunu (I_0) ölçebilmek için Geant4 Monte Carlo simülasyonları, gama kaynağı ve dedektör arasında malzeme kullanılmadan gerçekleştirilir. Malzeme içinden geçerek dedektöre ulaşan zayıflatılmış

foton yoğunluğu ölçümü için Monte Carlo simülasyonları dedektör ve kaynak arasında kullanılan malzemenin kalınlığı değiştirilerek tekrarlanır. $\ln(I_0/I)$ oranının malzeme kalınlığına göre oluşturduğu grafikte, veri noktalarına uygulanan doğrusal fit'in eğim parametresi lineer zayıflatma katsayısına eşittir. μ_m değerinin bulunabilmesi için, μ değeri malzemenin yoğunluğuna, ρ (g cm^{-3}), bölünür. Eş. 2 kullanılarak kütle zayıflatma katsayısı hesaplanabilir [9].

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (2)$$

Gama radyasyonu zayıflatma özelliğini karakterize eden başka bir parametre ise gama fotonu geçirgenlik oranı (T) (transmisyon oranı) olarak tanımlanabilir. Bu parametre malzeme içinden geçebilen foton miktarının (I) malzeme yüzeyine gelen foton miktarına (I_0) oranı olarak tanımlanır ve Eş. 3'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [6].

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

Bir malzeme için yarı değer kalınlığı (HVL) malzeme yüzeyine gelen foton miktarını yarıya indirgeyebilmesi için gerekli olan kalınlık olup, bu parametrenin lineer zayıflatma katsayısına bağımlılığı Eş. 4'de verilmiştir [8].

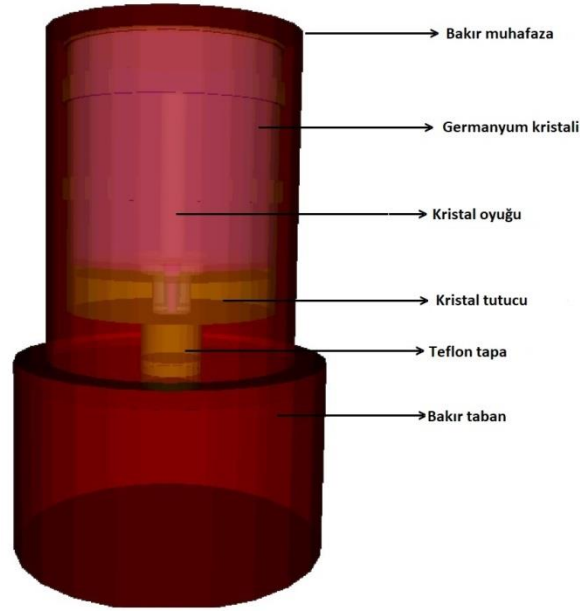
$$\text{HVL} = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (4)$$

Ortalama serbest yol (MFP) yalıtım parametresi, gama fotonunun malzeme içinde arda arda yaptığı iki etkileşim arasındaki mesafe olup Eş. 5 ile verilen formül kullanılarak hesaplanır [8].

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

2.2. Monte Carlo simülasyonları

Geant4 C++ tabanlı bir Monte Carlo simülasyon yazılımı olup, nükleer fizik, parçacık fiziği, tıbbi fizik gibi fiziğin farklı alanlarında kullanılan dedektörlerin modellenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [20]. Deneysel ekipman veya ölçüm numunelerinin bulunmadığı durumlarda bir deney düzeneği için ihtiyaç duyulan dedektör geometrisi ve yapısı, ölçümü yapılacak numunelerin kimyasal özellikleri ve geometrisi ile gama fotonlarının enerjileri, yönü ve miktarı C++ kodları kullanılarak Geant4'e aktarılabilir. $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{—Li}_2\text{O—}^{75}\text{TeO}_2$ camlarının radyasyon zayıflatma özelliklerinin karakterizasyonunun yapılabilmesi amacıyla yüksek saflıkta germanyum dedektörünün yapısı ve geometrisi modellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan HPGe dedektörü Canberra yarı iletken firması tarafından üretilmiş olup, 2.2 kg germanyum kristali iyonlaşma dedektörü olarak kullanılmıştır. Germanyum kristaline ek olarak bu dedektöre ait bakır muhafaza kabı, bakır taban, sinyal kontakları, kristalin yüzeyini kaplayan ince ölü tabaka, Kristal oyuğu ve teflon tapa gibi dedektörün yapısını oluşturan ekipmanlar gerçek geometri ve boyutlara bağlı kalınarak Geant4'e aktarılmıştır. Şekil 1 HPGe dedektörünün Geant4 modelini göstermektedir.



Şekil 1. Zayıflatma katsayılarının belirlenmesi için kullanılan HPGe dedektörünün Geant4 modeli.

Beer-Lambert yasaının ince foton demeti kullanıldığında geçerli olması nedeniyle, ince foton demeti oluşturmak ve aynı zamanda oluşabilecek sistematik hataları minimum seviyeye indirgeyebilmek için HPGe dedektörü ve gama foton kaynağı 200 mm çapında silindirik bir kurşun muhafaza içine yerleştirilmiştir. 3 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda silindirik bir oluk her iki kurşun muhafazanın merkezinde tanımlanarak 356 keV (^{133}Ba), 662 keV (^{137}Cs), 1173 keV (^{60}Co), 1330 keV (^{60}Co), 250 keV (^{60}Co) ve 4000 keV enerjili gama fotonları için dar foton demetinin oluşması sağlanmıştır. Ölçümü yapılan Eu_2O_3 — Li_2O — TeO_2 cam sistemine ait kimyasal bileşenler ve yoğunlukları Tablo 1’de verilmiştir [19]. Bu değerler kullanılarak cam numuneleri Geant4’e kodlanmış ve Şekil 2’de gösterildiği gibi gama kaynağı ile HPGe dedektörü arasında yerleştirilmiştir. Gama kaynağından yayılarak cam malzemelerin üzerine gelen foton yoğunluğunu (I_0) ölçebilmek için Monte Carlo simülasyonları dedektör ve kaynak arasında numune olmadan gerçekleştirilmiştir. Malzeme içinden geçerek dedektöre ulaşan foton yoğunluğunu ölçebilmek için dedektör ve kaynak arasında kullanılan cam malzemenin kalınlığı 1 ile 5 cm arasında değiştirilerek simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Tablo 1. $x\text{Eu}_2\text{O}_3-(25-x)\text{Li}_2\text{O}-75\text{TeO}_2$ ($x = \%1, \%2, \%3, \%4, \%5$ mol) cam sisteminin kimyasal bileşenleri ve yoğunlukları.

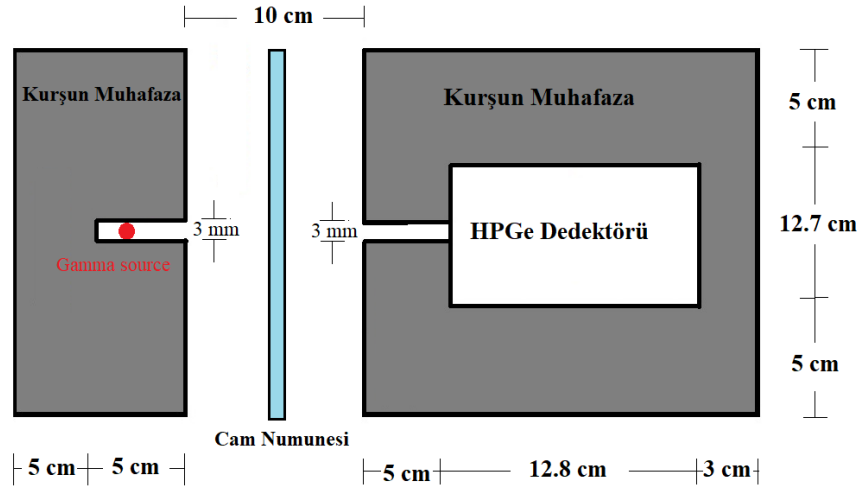
Cam kodu	Cam numunesi	Element kütle oranları (%)				Yoğunluk (gr cm^{-3})
		Li	O	Te	Eu	
ELT1	$1\text{Eu}_2\text{O}_3-24\text{Li}_2\text{O}-75\text{TeO}_2$	2.55	21.71	73.39	2.33	4.95
ELT2	$2\text{Eu}_2\text{O}_3-23\text{Li}_2\text{O}-75\text{TeO}_2$	2.38	21.43	71.62	4.54	4.98
ELT3	$3\text{Eu}_2\text{O}_3-22\text{Li}_2\text{O}-75\text{TeO}_2$	2.23	21.16	69.94	6.66	5.04
ELT4	$4\text{Eu}_2\text{O}_3-21\text{Li}_2\text{O}-75\text{TeO}_2$	2.08	20.90	68.33	8.68	5.11
ELT5	$5\text{Eu}_2\text{O}_3-20\text{Li}_2\text{O}-75\text{TeO}_2$	1.93	20.65	66.79	10.60	5.21

2.3 WinXCOM veri tabanı yazılımı

WinXCOM veri tabanı herhangi bir malzemenin kütle zayıflatma katsayısını hesaplamak için kullanılabilir ve bu yazılım herhangi bir deneysel kurulum veya simülasyon kodu gerektirmez [21]. Bu program aracılığı ile μ_m değerlerinin hesaplanması için Eş. 6'da verilen karışım kuralı kullanılır [9].

$$(\mu_m)_{glass} = \sum_i^n w_i (\mu_m)_i \quad (6)$$

Bu eşitlikte w_i and $(\mu_m)_i$ sırası ile kimyasal formülde yer alan i . elementin molekül içindeki kütle oranı ve o elemente ait kütle zayıflatma katsayısıdır.



Şekil 2. Geant4 Monte Carlo simülasyon düzeneğinin şematığı.

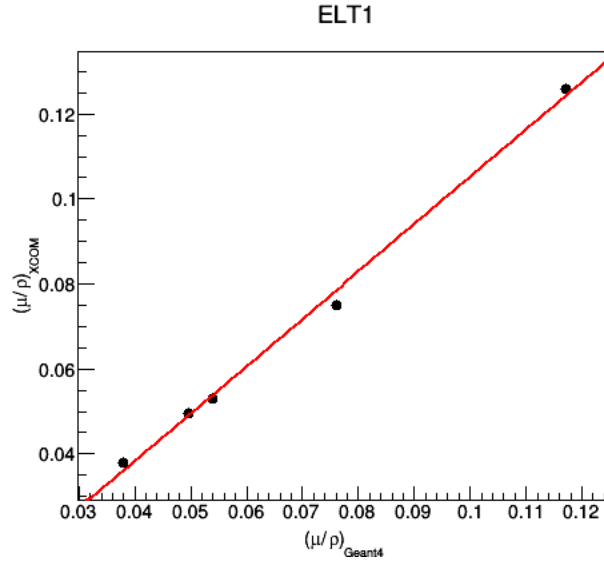
3. Sonuçlar ve tartışma

$\text{Eu}_2\text{O}_3-\text{Li}_2\text{O}-\text{TeO}_2$ (ELT) cam numuneleri için Geant4 Monte Carlo simülasyonları ve WinXCOM veri tabanı kullanılarak elde edilen μ_m sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Geant4 ile elde edilen kütle zayıflatma katsayılarının WinXCOM ile karşılaştırılması.

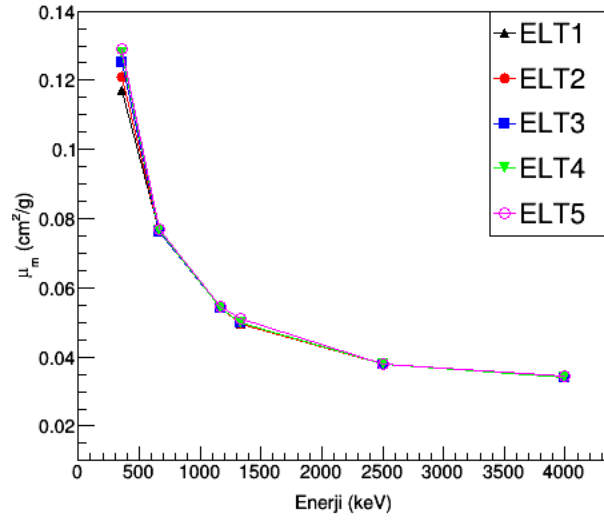
Cam kodu	356 keV		662 keV		1173 keV		1330 keV		2510 keV		4000 keV	
	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM
ELT1	0.117	0.126	0.0761	0.0751	0.0540	0.0531	0.0495	0.0496	0.0378	0.0378	0.0339	0.0339
ELT2	0.121	0.127	0.0762	0.0754	0.0542	0.0532	0.0497	0.0497	0.0379	0.0379	0.0341	0.0340
ELT3	0.124	0.128	0.0762	0.0756	0.0543	0.0533	0.0499	0.0497	0.0379	0.0379	0.0341	0.0341
ELT4	0.128	0.129	0.0766	0.0759	0.0543	0.0533	0.0500	0.0498	0.0380	0.0380	0.0342	0.0342
ELT5	0.129	0.1300	0.0769	0.0761	0.0546	0.0534	0.0511	0.0498	0.0381	0.0381	0.0345	0.0343

Elde edilen sonuçların uyumluluğunu belirlemek amacıyla Geant4 sonuçları (x-ekseni) WinXCOM sonuçlarına (y-ekseni) göre grafiklenmiş ve veri noktalarının bir biri ile olan korelasyon sonucuna (R^2 değeri) bakılmıştır. Şekil. 3’de ELT1 camı için elde edilmiş korelasyon grafiği örnek olarak verilmiştir. R^2 değerleri ELT1 camı için 0.995, ELT2 camı için 0.998, ELT3, ELT4 ve ELT5 camları için 0.999 olarak bulunmuştur. R^2 değerlerinin 1’e çok yakın olması elde edilen sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.



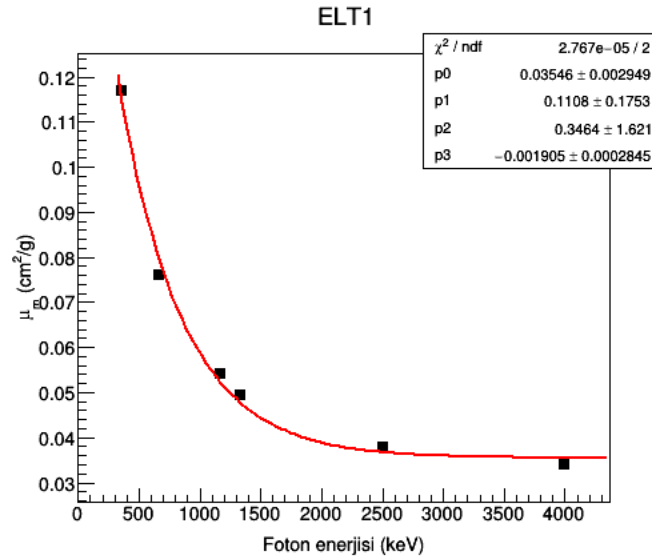
Şekil 3. ELT1 camına ait korelasyon grafiği.

ELT cam sistemi için hesaplanan μ_m değerlerinin gama fotonu enerjisine göre grafiği Şekil 4’de gösterilmiştir. Bu grafikte görüldüğü gibi, 356 keV enerjisinde μ_m yüksek değerlere sahip olup, 1100 keV seviyesine kadar keskin bir azalma göstermekte ve 1100 keV’nin üzerindeki enerjilerde μ_m değerleri bir birine yakın sonuçlar vermektedir. Bu durum gama enerji spektrumunun düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki fotonların madde içindeki etkileşim mekanizmalarıyla açıklanabilir düşük enerji bölgesinde foto elektrik etkileşim mekanizması baskın olup malzemenin kimyasına (malzemeyi oluşturan elementlerin atom numaralarına) büyük oranda bağlıdır. 1100 keV ve daha yüksek enerjilerde çift oluşum süreci etkin olup, etkileşim mekanizması malzemenin kimyasına çok daha zayıf bir şekilde bağlılık göstermektedir.



Şekil 4. ELT camlarına ait kütle zayıflatma katsayılarının enerjiye foton enerjisine göre değişimi.

ELT camlarının 356 keV ile 4000 keV arasındaki herhangi bir enerjide μ_m değerinin hesaplanabilmesi amacıyla $\mu_m = p_0 + p_1 \cdot \exp(p_2 + p_3 \cdot E)$ formunda 4 parametrelilikli eksponensiyel bir fit ELT camları için elde edilen μ_m değerlerine uygulanarak μ_m değerlerini istenilen enerjilerde hesaplayabilecek formüller türetilmiştir. Şekil 5'de ELT1 camına ait μ_m değerlerine uygulanan eksponensiyel fit örneği gösterilmiştir. Diğer cam numuneleri için elde edilen fonksiyonlar Tablo 3'de verilmiş olup farklı gama enerjileri fonksiyonlardan elde edilen μ_m sonuçlar, Geant4 simülasyonlarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

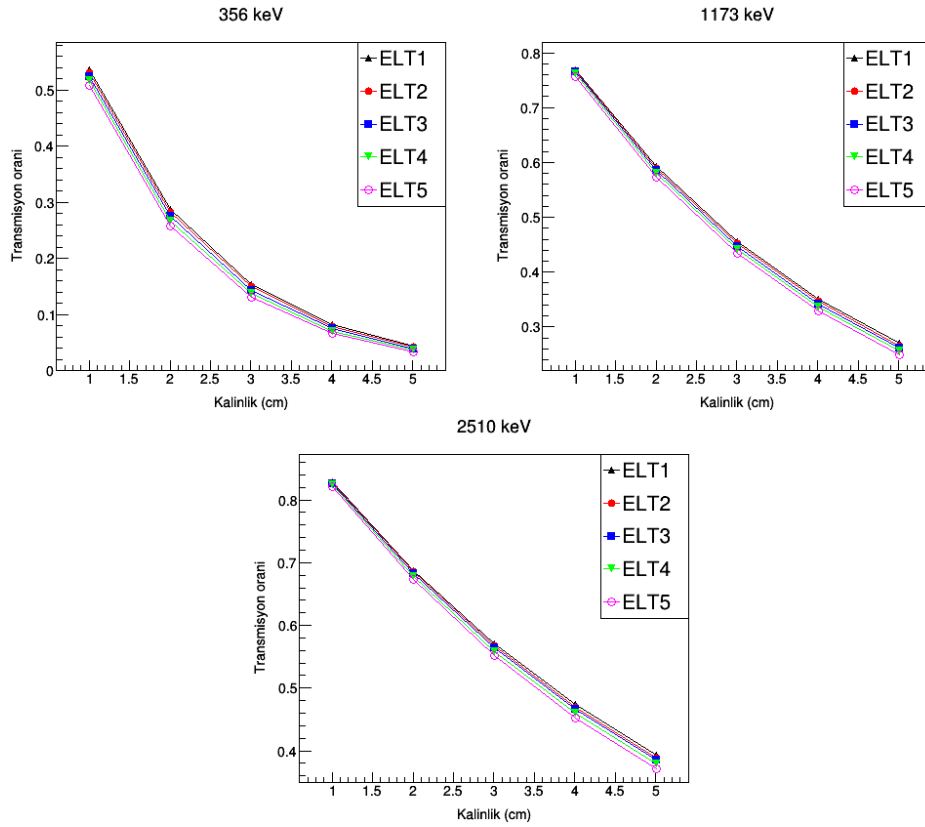


Şekil 5. ELT1 camı kütle zayıflatma katsayılarına uygulanan dört parametrelilikli üstel fit.

Tablo3. Kütle zayıflatma katsayısı (μ_m) eşitlikleri ve Geant4 sonuçları ile karşılaştırılması.

Cam	Fonksiyon	Enerji	μ_m (cm ² g ⁻¹)		Fark (%)
			Fonksiyon	Geant4	
ELT1	$\mu_m = 0.0354 + 0.110 \cdot \exp(0.346 - 0.00190 \cdot E)$	427.9 (¹²⁵ Sb)	0.104	0.109	4.6
ELT2	$\mu_m = 0.0365 + 0.116 \cdot \exp(0.409 - 0.00208 \cdot E)$	795.8 (¹³⁴ CS)	0.0698	0.0712	2.0
ELT3	$\mu_m = 0.0368 + 0.126 \cdot \exp(0.435 - 0.00220 \cdot E)$	834.8 (⁵⁴ Mn)	0.0678	0.0653	3.8
ELT4	$\mu_m = 0.0371 + 0.126 \cdot \exp(0.454 - 0.00226 \cdot E)$	1112.1 (¹⁵² Eu)	0.0531	0.0540	1.6
ELT5	$\mu_m = 0.0376 + 0.130 \cdot \exp(0.438 - 0.00229 \cdot E)$	3000	0.0378	0.0381	0.8

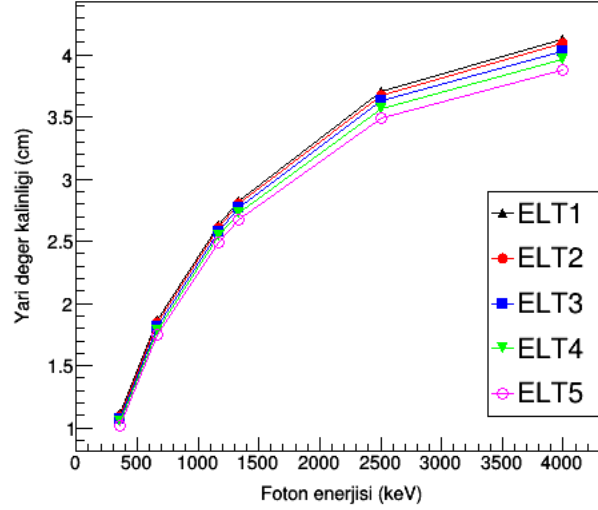
ELT camlarının 356, 1173 ve 2510 keV gama enerjilerindeki transmisyon oranları 1 - 5 cm cam kalınlıklarına göre grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bir malzemenin transmisyon oranının küçük olması gama foton yoğunluğunu azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Verilen grafiklerde görüldüğü gibi Eu oranı en yüksek olan ELT5 camı bütün enerjilerde en düşük transmisyon oranına sahiptir. Bu durum Eu'nun sahip olduğu yüksek atom numarası (Z = 63) ile açıklanabilir. Yüksek enerjili gama fotonlarının malzeme içine nüfuz etme oranı düşük enerjili gama fotonlarına göre yüksek olduğu için gama enerjisi arttıkça transmisyon oranlarının arttığı bu grafiklerde açıkça görülebilmektedir.



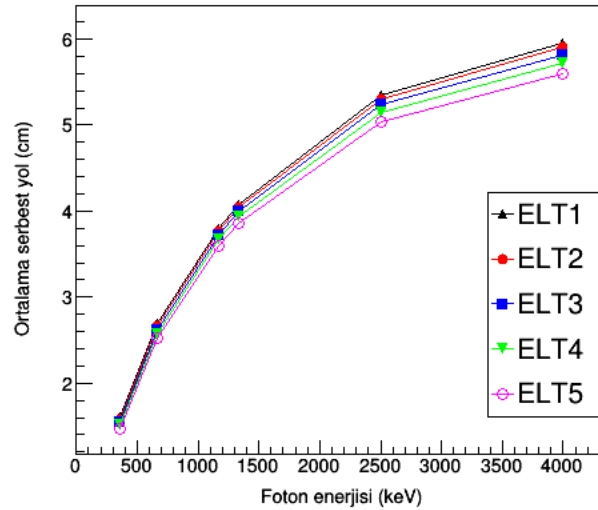
Şekil 6. 356, 1173 ve 2510 keV gama enerjileri için ELT camları transmisyon oranları.

Yarı değer kalınlığı (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) bir malzemenin gama yalıtım özelliğini karakterize eden iki önemli parametredir. Bu değerlerin küçük olması malzemenin gama zayıflatma özelliğinin iyi seviyede olduğunu göstermektedir. ELT camları için elde edilen HVL ve MFP grafikleri Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Daha

önce belirtildiği gibi, yüksek enerjili gama fotonlarının yüksek giricilik özelliğinden dolayı gama enerjisi arttıkça HVL ve MFP değerlerinin arttığı bu grafiklerden görülebilmektedir. Yüksek atom numaralı Eu elementinin en fazla bulunduğu ELT5 camının HVL ve MFP değerlerinin diğer camlara göre daha az olduğu bu grafiklerde açıkça görülmektedir. Bu nedenle, yüksek enerjilerde gelen gama fotonlarının etkin bir şekilde zayıflatılabilmesi için kalın cam malzemelerinin kullanılması gerekmektedir.



Şekil 7. Yarı değer kalınlığının foton enerjisine göre değişimi.



Şekil 8. Ortalama serbest yol parametresinin foton enerjisine göre değişimi.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{—Li}_2\text{O—TeO}_2$ camlarına ait gama yalıtım parametreleri yüksek saflıkta germanyum dedektörünün Geant4 modeli ile üretilen Monte Carlo simülasyonları

ve WinXCOM veri tabanı kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçların analizi sonucunda aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Yüksek saflıkta germanyum dedektörünün Geant4 modeli malzemelerin gama yalıtım özelliklerinin araştırılması çalışmalarında ve deneysel ekipman ve numunelerin bulunmaması durumunda yalıtım parametrelerinin tespiti amacıyla kullanılabilir
- Geant4 ile elde edilen kütle zayıflatma katsayıları WinXCOM ile bulunan sonuçlarla uyumludur. Kütle zayıflatma katsayıları düşük enerjilerde yüksek değerlere sahip olup gama enerjisi yükseldikçe bu katsayılar hızla azalma göstermektedir. 1100 keV ve üzerindeki enerjilerde bu azalma çok küçük oranlarda gözlemlenmiştir. Kütle zayıflatma katsayılarında gözlemlenen bu durum gama fotonu etkileşim mekanizmaları ile uyumludur.
- Kütle zayıflatma katsayılarına uygulanan üstel fit sonucunda elde edilen fonksiyonlar, simülasyon veya başka bir çalışmaya gerek duymadan istenilen 356 – 4000 keV arasında istenilen enerjide kütle zayıflatma katsayısını hesaplayabilmektedir.
- ELT cam sisteminde bulunan Eu oranının %1'den %5'e çıkarılması ile kütle zayıflatma katsayılarında artış, transmisyona, yarı değer kalınlığı ve ortalama serbest yol parametrelerinde azalmaya neden olarak cam sisteminin gama yalıtım özelliklerini iyileştirmiştir.

Kaynaklar

- [1] Kılınçarslan, Ş., Başyigit, C. ve Akkurt, İ., Barit Agregalı ağır betonların radyasyon zırlama amacıyla kullanımının araştırılması, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 22, 393-399, (2007).
- [2] Akkas, A., Tugrul, A.B., Addemir, A.O., Marsoglu, M. ve Agacan B., Radiation shielding effect of boron carbide aluminum metal matrix composite, **Acta Physica Polonica A.**, 127, 947-949, (2015).
- [3] Sharaf, J.M. ve Hamideen, M.S., Photon attenuation coefficients and shielding effects of jordanian building materials, **Annals of Nuclear Energy**, 62, 50-56, (2013).
- [4] Olukotun, S.F., Gbenu, S.T., Ibitoye, F.I., Oladejo, O.F., Shittu, H.O., Fasasi, M.K. ve Balogun F.A., Investigation of gamma radiation shielding capability of two clay materials, **Nuclear Engineering and Technology**, 50, 957-962, (2018).
- [5] Singh, V.P., Shirmardi, S.P., Medhat, M.E. ve Badiger, N.M., Determination of mass attenuation coefficient for some polymers using monte carlo simulation, **Vacuum**, 119, 284-288, (2015).
- [6] Gokce, H.S., Ozturk, B.C., Cam, N.F. ve Cakir O.A., Gamma-ray attenuation coefficients and transmission thickness of high consistency heavyweight concrete containing mineral admixture, **Cement & Concrete Composites**, 92, 56-69, (2018).
- [7] Singh, J., Singh, H., Sharma, J., Singh, T. ve Singh P.S., Fusible alloys: a potential candidate for gamma rays shield design, **Progress in Nuclear Energy**, 106, 387-395, (2018).

- [8] Kumar, A., Kaur, R., Sayyed, M.I., Rashad, M., Singh, M. ve Ali, A.M., Physical, structural, optical and gamma ray shielding behavior of $(20+x)\text{PbO}-10\text{BaO}-10\text{Na}_2\text{O}-10\text{MgO}-(50-x)\text{B}_2\text{O}_3$ glasses, **Physica B Condensed Matter**, 552, 110-118, (2019).
- [9] Bagheria, R., Moghaddam, A.K., Shirmardi, S.P., Azadbakht, B. ve Saleh M., Determination of gamma-ray shielding properties for silicate glasses containing Bi_2O_3 , PbO , and BaO , **Journal of Non-Crystalline Solids**, 479, 62-71, (2018).
- [10] Tijani, S.A., Kamal, S.M., Al-Hadeethi, Y., Arib M., Hussein, M.A., Wageh, S. ve Dim L.A., Radiation shielding properties of transparent erbium zinc tellurite glass system determined at medical diagnostic energies, **Journal of Alloys and Compounds**, 741, 293-299, (2018).
- [11] Kumar, A., Gamma ray shielding properties of $\text{PbO}-\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ glasses, **Radiation Physics and Chemistry**, 136 50-53, (2017).
- [12] Kaewjaeng, S., Kothan, S., Chanthima, N., Kim, H. ve Kaewkhao J., Gamma radiation shielding materials of lanthanum calcium silicoborate glasses, **Materials Today: Proceedings**, 5, 14901-14906, (2018).
- [13] Dogra, M., Singh, K.J., Kaur, K., Anand, V., Kaur, P., Singh, P. ve Bajwa B.S., Investigation of gamma ray shielding, structural and dissolution rate properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}$ glass system, **Radiation Physics and Chemistry**, 144, 171-179, (2018).
- [14] Dong, M.G., El-Mallawany, R., Sayyed, M.I. ve Tekin, H.O., Shielding properties of $80\text{TeO}_2-5\text{TiO}_2-(15-x)\text{WO}_3-x\text{AnO}_m$ glasses using WinXCOM and mcnp5 code, **Radiation Physics and Chemistry**, 141, 172-178, (2017).
- [15] Sakida, S., Hayakawa, S. ve Yoko, T., Part 2 ^{125}Te NMR study of $\text{M}_2\text{O}-\text{TeO}_2$ (M= Li, Na, K, Rb and Cs) glasses, **Journal of Non-Crystalline Solids**, 243, 13-25, (1999).
- [16] Heo, J., Lam, D., Sigel, G.H., Mendoza, E.A. ve Hensley, D.A., Spectroscopic analysis of the structure and properties of alkali tellurite glasses, **Journal of the American Ceramic Society**, 75, 277-281, (1992).
- [17] Wang, J., Vogel, E. ve Snitzer, E, Tellurite glass: a new candidate for fiber devices, **Optical Materials**, 3, 187-203, (1994).
- [18] Reisfeld, R. ve Kalisky, Y., Nd^{3+} and Yb^{3+} germanate and tellurite glasses for fluorescent solar energy collectors, **Chemical Physics Letter**, 80, 178-183, (1981).
- [19] Kumar, H., Khanna, A., Structural, thermal and photoluminescent properties of $\text{Eu}_2\text{O}_3-\text{Li}_2\text{O}-\text{TeO}_2$ glasses, **Journal of Luminescence**, 204, 319-326, (2018).
- [20] Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Geant4-a simulation toolkit, **Nuclear Instrumentation and Methods in Physics A.**, 506, 3, 250-303, (2003).
- [21] Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B. ve Lerving H., WinXCom - A program for calculating X-ray attenuation coefficients, **Radiation Physics and Chemistry**, 71, 653-654, (2004).